Revista CIENCIA **Vol. 20, 1, 13-33 (2018)**

SHEAR WAVE VELOCITY IS NOT ENOUGH TO CLASSIFY THE SOIL

R. Aguiar [1,2], A. Espinosa [3], J. Carrión [3], V. Zambrano [2]

[1]Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Av. General Rumiñahui s/n Valle de los Chillos, Ecuador. rraguiar@espe.edu.ec
[2]Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta Ecuador.
[3]Maestría en Geotecnia. Universidad Central del Ecuador

Received: December 2017. Accepted: January 2018

ABSTRACT

After the earthquake of April 16, 2016, which had a magnitude of 7.8; geophysical studies were carried out in seventeen places in the city of Bahía de Caráquez to issue a diagnosis on seismic vulnerability of some buildings. Thirteen of the seventeen analyzed soils were classified as C type profiles and the remaining 4, like profiles D. But the shear wave velocity to a depth of 30m Vs30 of 4 sites with D type profiles soils is high, for that reason it can be indicated that the seventeen places where there were and are important structures, are resistant soils according to the classification of the Ecuadorian Construction Standard of 2015.

In this article, we present the relationship between the shear wave velocities to a depth of 30m Vs30, with the dominant frequency of the soil and with the amplitude of the Fourier Spectrum associated to the dominant frequency, of the seventeen soils of Bahia of Caráquez. In the same way, these geophysical parameters are compared with the results of similar studies carried out with two databases; the first with earthquakes recorded in Japan and the second with earthquakes from the NGA-West2 database.

Finally, it is concluded that the soil classification of the NEC-15, based more on the shear wave velocity Vs30, should be complemented with the inclusion of the soil vibration period or with the maximum amplitude of the Fourier Spectrum.

Keywords: Fourier spectral. Shear wave velocities.

LA VELOCIDAD DE LA ONDA DE CORTE NO ES SUFICIENTE PARA CLASIFICAR EL SUELO

RESUMEN

Después del terremoto del 16 de abril de 2016, que tuvo una magnitud de 7.8; se realizó estudios geofísicos en 17 lugares de la ciudad de Bahía de Caráquez, para emitir un diagnóstico sobre la vulnerabilidad sísmica de algunos edificios; 13 de los 17 suelos analizados clasificaron como perfiles tipo “C” y 4 como tipo “D”. Pero la velocidad de la onda de corte de los 4 sitios con suelo “D”, es alta, de tal manera que se puede indicar que los 17 lugares donde se encontraban y se

encuentran estructuras importantes eran suelos resistentes, de acuerdo a la clasificación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2015. Entonces.

En este artículo, se presenta la relación que existe entre la Velocidad de la Onda de Corte en los primeros 30 metros, con la frecuencia dominante del suelo y con la amplitud del Espectro de Fourier asociada a la frecuencia dominante, de los suelos de Bahía de Caráquez. De igual manera se compara estos parámetros geofísicos con los resultados de estudios similares realizados con dos bases de datos; la primera con sismos registrados en Japón y la segunda con sismos de la base de datos NGA-West 2.

Finalmente se concluye que en la clasificación de los suelos de la NEC-15 basada más en la Velocidad de la Onda de Corte debe ser complementada con la inclusión del período de vibración del suelo o con la amplitud máxima del Espectro de Fourier.

Palabras clave: Espectros de Fourier. Velocidad de onda de corte.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las ciudades más afectadas del terremoto del 16 de abril de 2016, que tuvo una magnitud de 7.8, fue Bahía de Caráquez, y a nivel de edificios altos del orden de los 10 pisos, fue la que más destrucción tuvo en el Ecuador (Aguiar y Mieles, 2016). El daño de las estructuras se atribuyó en parte a la amplificación de las ondas sísmicas por efecto del suelo.

Algunas de las estructuras afectadas, tuvieron daño en el sismo de Bahía de Caráquez de 1998, pero fueron reforzadas y tuvieron un comportamiento aceptable durante el terremoto de 2016, caso de los edificios Salango y Spondylus de 10 pisos cada una, aunque la primera fue derrocada post terremoto.

Otras soportaron el sismo de Bahía de Caráquez de 1998, de magnitud 7.1 pero no fueron reforzadas, únicamente fueron reparadas y durante el terremoto de 2016, tuvieron un daño considerable que condujo, después del terremoto, al derrocamiento, caso del Edificio Cevallos de 5 pisos; muy probablemente durante el sismo de 1998, sus elementos estructurales ingresaron al rango no lineal con fisuras milimétricas en vigas y columnas que a lo mejor no fueron vistas por sus propietarios o si las vieron no las dieron importancia. Aguiar *et al.* (1998)

Cuando una estructura tiene gran daño a nivel de mampostería y no se observa afectación en los elementos estructurales; es importante que se realice un estudio detenido de vulnerabilidad sísmica, que se simule el comportamiento de la estructura con los registros de aceleración del suelo del sismo y en caso de no disponer con registros similares y se determine un índice de daño. Lo más probable es que sus elementos estructurales tuvieron daño que no es visible porque están tapados por un cielo raso falso o por la mampostería.

En Ciudad de México varios edificios que soportaron el terremoto de 1985 que tuvo una magnitud de 8.2, no fueron capaces de resistir el sismo de 2017 de magnitud 7.1, porque no fueron reforzados luego del terremoto de 1985,

simplemente fueron reparados; los dos sismos se registraron la misma fecha, 19 de septiembre. Si no se refuerza una estructura que ha sido afectada se da lo que se denomina ***daño acumulado*** y en un próximo sismo aunque sea de menor magnitud sufrirá una destrucción considerable. Rodríguez (2015)

Un perfil de suelo tipo "C" de acuerdo al NEC-15 tiene una velocidad de la onda de corte en los primeros 30 m, entre $360 \leq V_{s30} < 760\, m/s$, y el perfil de suelos tipo "D" el valor de $180 \leq V_{s30} < 360\, m/s$.

Después del terremoto de 2016, el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI contrató un estudio de vulnerabilidad sísmica de 18 edificios de la ciudad de Bahía de Caráquez, para determinar fundamentalmente si deben ser derrocados o si ameritan ser reforzados. Esto fue porque algunos propietarios que residen en viviendas de 1 o 2 pisos tenían temor de estar al lado de edificios de altura que tuvieron algún tipo de daño. Pero también había presión del sector hotelero ya que Bahía de Caráquez es una ciudad turística que daba mala imagen con alguno de sus edificios dañados.

Al realizar la consultoría de los 18 edificios, obligatoriamente se tenían que realizar estudios geofísicos del lugar donde se hallan las construcciones; en algunos casos los estudios se realizaron en la calle ya que no había espacio para hacerlo en las áreas verdes de la construcción. Se tiene en total 17 estudios, debido a que los edificios Fragata y Salango son esquineros y estaban separados por la calle Hidalgo, que fue el lugar donde se realizó una de las líneas sísmicas.

En este artículo se presenta el resultado de los estudios geofísicos realizados en 17 lugares de la ciudad de Bahía de Caráquez y ahí se ve que prácticamente todos los suelos de la ciudad son tipo "C". Estrictamente 13 son tipo "C" y 4 son tipo "D" pero con valores muy altos de V_{s30}. Entonces si hubo efectos de sitio se debe analizar el período de vibración del suelo para clasificar de mejor forma al suelo.

Se destaca que los períodos de vibración del suelo, medidos en Bahía de Caráquez, son menores a 1 segundo. Se realiza esta acotación porque en la Secretaría de Comunicación y Transporte SCT, de Ciudad de México el período de vibración del suelo es 1.8 segundos. (Rodríguez, 2017) que realmente es un suelo muy blando. En el sismo de 2017 de México los edificios que tuvieron un mal comportamiento se encontraban en la zona de transición entre el suelo blando y el suelo duro, que son de la zona II cuyo período de vibración se halla entre 1 y 1.5 segundos, aproximadamente. Con esto lo que se pretende indicar es que el suelo de la Puntilla de Bahía de Caráquez tiene un valor de la onda de corte alto y un período de vibración del suelo en algunos sitios un poco alto pero distantes a los períodos de los suelos blandos de Ciudad de México.

2. ESTRUCTURAS EN QUE SE HICIERON ESTUDIOS GEOFÍSICOS

En este apartado se presentan una buena parte de las 18 estructuras que fueron contratadas por MIDUVI para ver su vulnerabilidad estructural pero se recuerda que lo que más interesa es ver los resultados del estudio geofísico que

conduce al cálculo del período de vibración del suelo. Se piensa que este parámetro da más información que la Velocidad de la Onda de Corte, V_{s30}.

- **Edificio Fragata**

Este edificio, de 10 pisos, fue muy estudiado por Aguiar (2017) y demostró que la estructura tenía ductilidad y que podía ser reparado; es más presentó tres alternativas de reforzamiento pero fue derrocado por que no se entendió o no se aceptó la filosofía de diseño que indica que ante un terremoto la estructura puede sufrir daño.

El primer piso estaba destinado a parqueaderos y sobre su losa se construyó una piscina y espejos de agua, lo que implica un gran peso en este piso y consecuencia de ello la mayor parte de sus columnas sufrieron daño a nivel de recubrimiento en la parte inferior, no se deformó la armadura longitudinal de las columnas afectadas, el daño fue a nivel de recubrimiento del hormigón. En ningún otro piso existió daño en columnas.

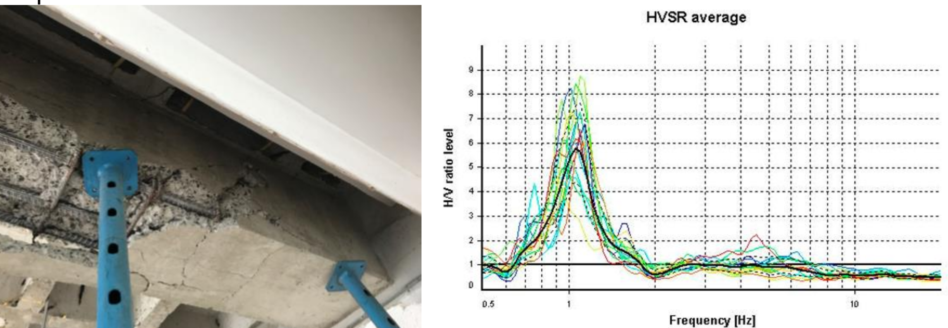


Figura 1 Daño en viga corta y relaciones H/V del suelo.
Fuente: Sánchez (2016).

En los elementos horizontales el daño se dio la falla denominada *viga corta*, en varios pisos pero en el mismo vano; únicamente en los pisos superiores no existió esta falla de *viga corta.* En la fotografía de la figura 1, se observa la falla de viga corta.

A la derecha de la figura 1 se presenta la relación H/V del suelo en que se puede apreciar el f_{peak} y A_{peak}. Frente al Edificio Fragata, existía el Edificio Salango, también de 10 pisos y que fue derrocado. A los dos edificios les separaba una calle por lo que el estudio de suelos realizado sirvió para el Informe de los dos edificios.

El valor de V_{s30} del suelo que soportaba este edificio es de 390 m/s, de tal manera que es un perfil de suelo tipo "C".

- **Edificio Salango**

En la figura 2 (a) se observa la parte exterior del Edificio Salango, después del terremoto del 16 de abril de 2016; en la parte inferior de la fotografía se observa un pequeño volado en su contorno que correspondía al lugar donde se hallaba la piscina. Este edificio soportó el sismo de Bahía de Caráquez de 1998 y fue reforzado

mediante la incorporación de muros de corte, los mismos que fueron acoplados a las columnas circulares del edificio.

Durante el terremoto de 2016, presentó un daño similar al Edificio Fragata, aunque en este edificio en un piso se presentó una falla de punzonamiento que fue bien marcado alrededor de una columna redonda.

Si en el Edificio Salango al igual que en el Edificio Fragata se construía las paredes con Gypsum, en lugar de bloques prensados que son más pesados, no se habrían alarmado tanto sus propietarios ya que habrían visto un mínimo daño en el Gypsum. Es imposible pensar que un edificio que ha sido reforzado no vaya a tener cierto grado de daño en un terremoto.

En la figura 2 (b) se ve el estado en que quedó la fachada principal del Edificio Fragata, luego del terremoto de 2016. En honor a la verdad se debe decir que en la parte interior de estos dos edificios se tuvo un daño considerable en la mampostería.



(a) **(b)**

Figura 2 Fotografías tomadas después del terremoto del 16 de abril de 2016; (a) Edificio Salango; (b) Edificio Fragata

El primer autor de este artículo, no comparte el informe de Sánchez (2016) en el que concluyen que los dos edificios Salango y Fragata deben ser derrocados, se debió pedir la opinión de un experto o convocar a quien reforzó el Edificio Salango y al Proyectista Estructural del Edificio Fragata para que den su opinión sobre el informe de Sánchez (2016).

- **Edificio Zedeño**

Algunos pisos de este edificio que se muestra a la izquierda de la figura 3; no estaban terminados y son los que están sin ventanas en el piso 3, 4 y 6; sobre este piso hay una ampliación con una cubierta inclinada apoyada en vigas de hormigón armado, a la derecha de esta gráfica se presenta la relación espectral H/V del suelo.

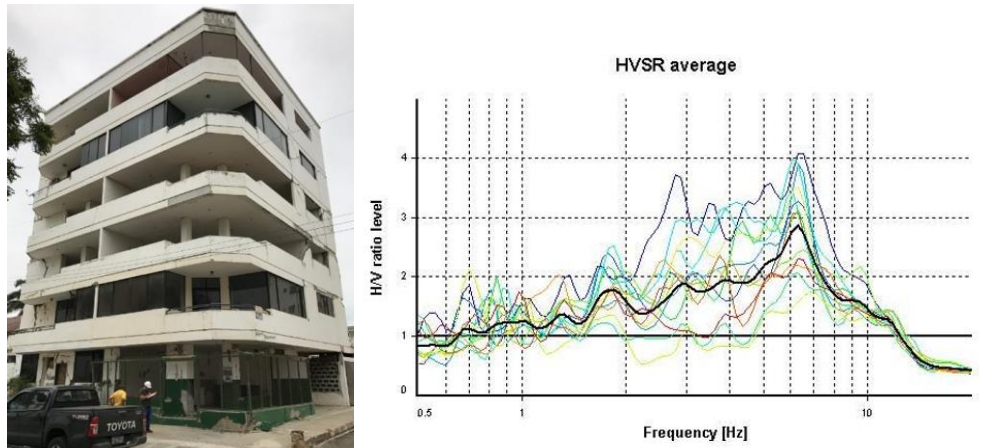


Figura 3 Edificio Zedeño y relaciones espectrales H/V del suelo.
Fuente: Sánchez (2016)

El valor de $V_{s30} = 560\, m/s$, de tal manera que se trata de un suelo muy resistente tipo "C" de acuerdo al NEC-15.

Este edificio de 7 pisos fue construido en 1994 y durante el sismo de 1998 tuvo daño. En uno de los retiros de la planta baja se hicieron ampliaciones que fueron muy dañadas en el terremoto de 2016. La mampostería del edificio fue de ladrillo macizo que fue dañada en el terremoto.

- **Edificio Cevallos**

El Edificio Cevallos o Ganadero, se hallaba aproximadamente a 100 m, de distancia del Edificio Zedeño, ver figuras 4 (a) y (b) sin embargo tienen diferentes períodos de vibración del suelo.

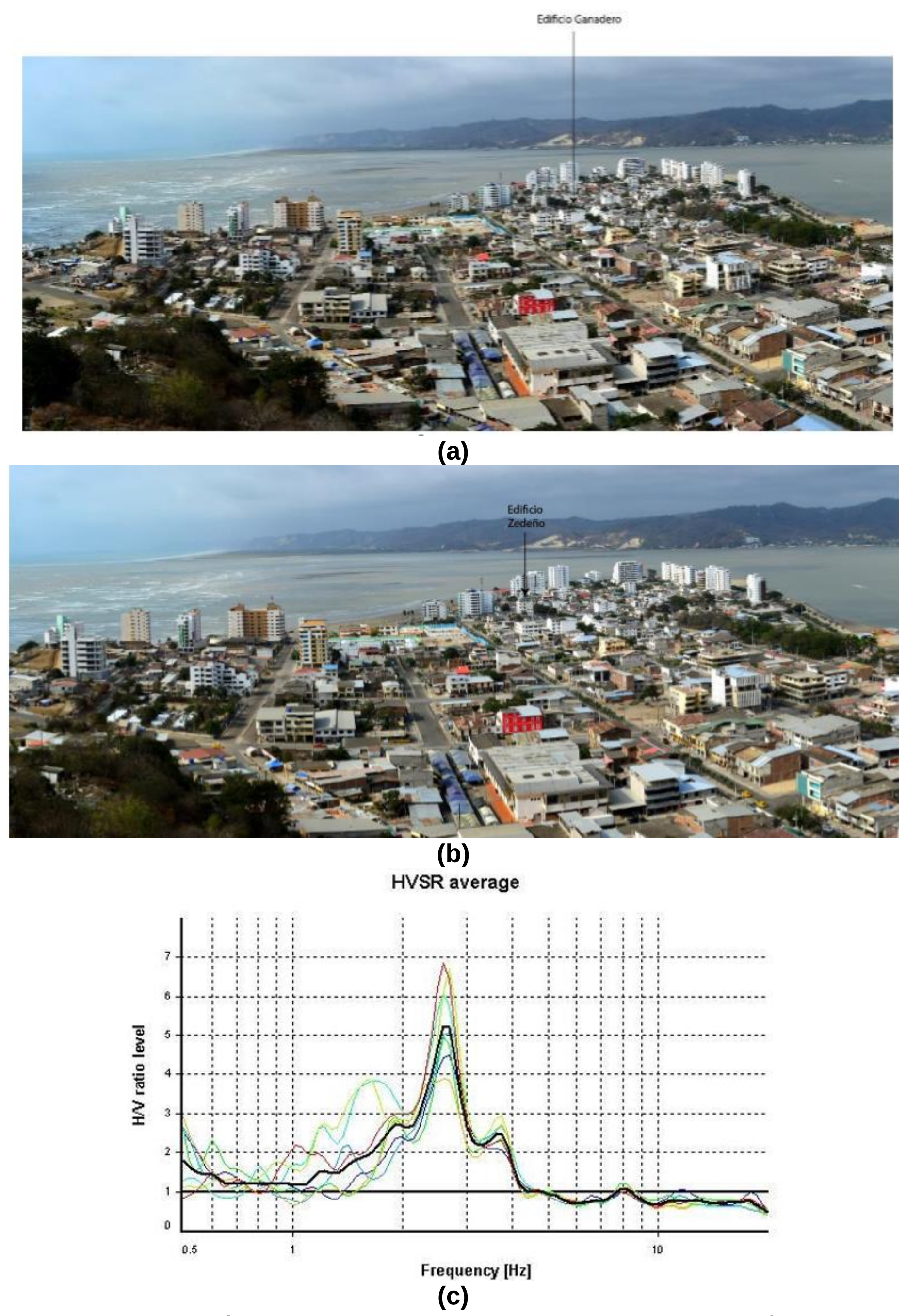


Figura 4 (a) Ubicación de Edificio Ganadero o Cevallos; (b) Ubicación de Edificio Zedeño; (c) Relación espectral H/V en suelo de Edificio Cevallos.

En efecto, en la figura 4 (c) se aprecia el espectro de Fourier del suelo (calle) donde se hallaba el Edificio Cevallos se ve que el valor medio de la frecuencia dominante se halla entre 1 y 2 Hz; y que la amplitud es ligeramente mayor a 5. Por

otra parte, en la figura 4 se ve que el valor medio de la frecuencia dominante se halla entre 6 y 7, que la amplitud es menor ligeramente menor a 3.

La velocidad de la onda de corte V_{s30} es de 355 m/s, que ligeramente dejaría de ser suelo tipo “C” y pasa a ser suelo tipo “D” por muy poco, por lo que se le considera también un suelo muy resistente.

El Edificio Cevallos era de hormigón armado de 4 pisos que soportó el sismo de Bahía de Caráquez de 1998 pero que tampoco fue reforzado y posteriormente incrementaron un piso. En este edificio todas las columnas de la planta baja tuvieron gran daño en la parte superior, la armadura longitudinal presentaba pandeo considerable. En este edificio se justifica que lo hayan derrocado.

- **Edificio Jalil**

El Edificio Jalil, soportó el sismo de 1998, se desconoce si fue reforzado después del sismo de 1998, de igual manera tampoco se conoce el grado de daño que tuvo en el terremoto de 2016, lo único que se puede decir es que tuvo 7 pisos y que era de hormigón armado, como se muestra en la figura 5; a la derecha se ve el Espectro de Fourier del suelo.

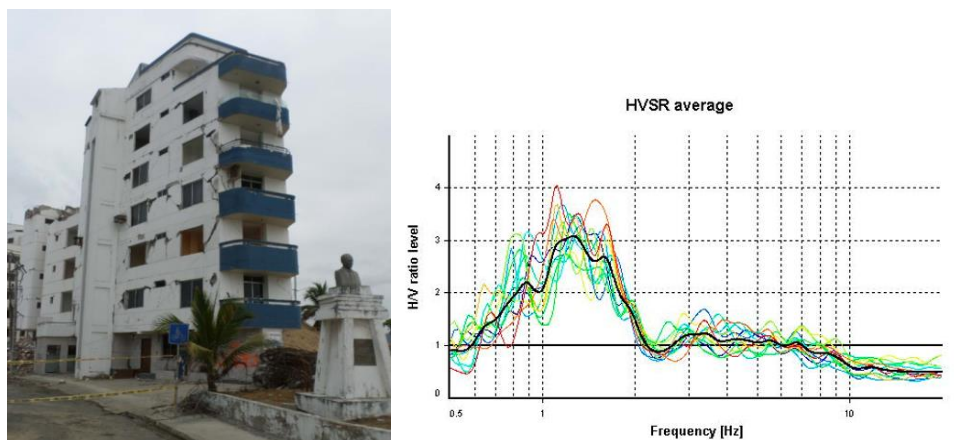


Figura 5 Edificio Jalil de 7 pisos y Espectros de Fourier del suelo.
Fuente: Sánchez (2016)

La velocidad de la onda de corte en los primeros 30 m, es de 390 m/s, de tal manera que clasifica como un perfil de suelo tipo “C”. Este edificio fue derrocado después del terremoto.

- **Edificio Vigía**

Edificio que tuvo poco daño en el sismo de 1998, por lo que fue solo reparado. Ahora, en el terremoto del 2016 (que fue mucho más fuerte) tuvo daño en algunos elementos estructurales. Parece ser que este edificio de hormigón armado de 10 pisos lo han reparado, se espera que también lo hayan reforzado. En la figura 6 se observa la fachada lateral del edificio y el Espectro de Fourier del suelo.

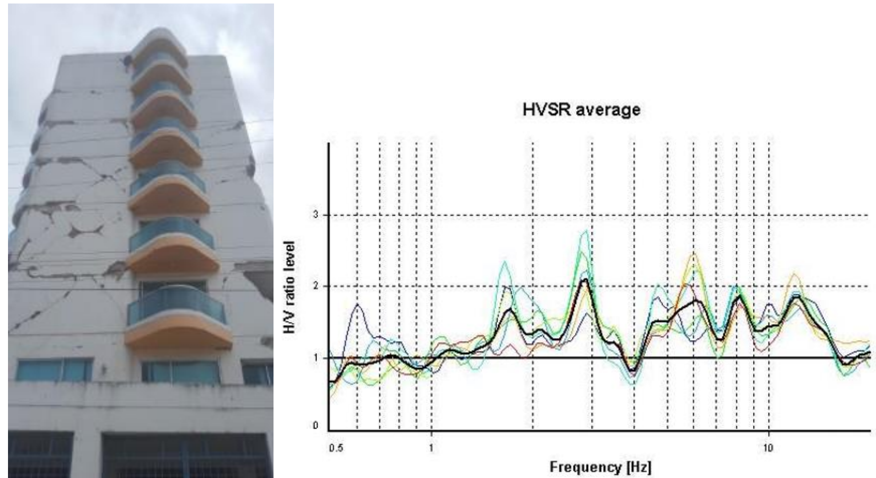


Figura 6 Fachada lateral de Edificio Vigía y Espectro de Fourier del suelo
Fuente: Sánchez (2016)

El valor de V_{s30} es de 430 m/s. Por lo tanto, se trata de un perfil de suelo tipo "C".

- **Las Brisas**

Edificio que soportó el sismo de 1998, con una estructura muy irregular en planta es de 10 pisos. En la figura 7 se muestra una de las fachadas laterales y se observa daño a nivel de mampostería; en la fotografía de la derecha se ve que una pared de ladrillo se volteó debido a que los estribos eran de 6 mm, de diámetro y muy espaciados, En la parte inferior se ve el espectro de Fourier del suelo.



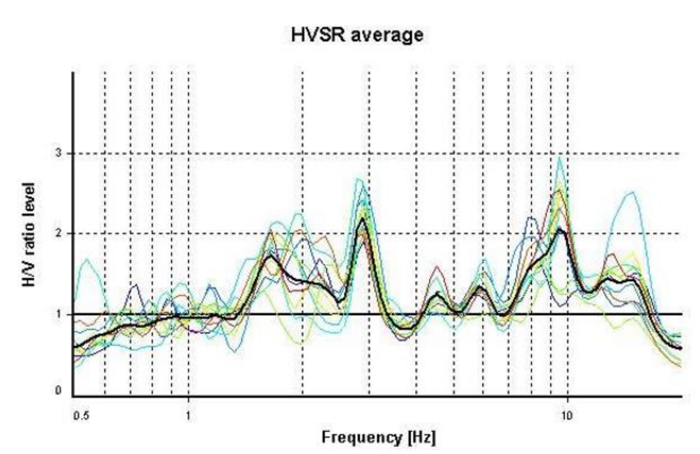


Figura 7 Fachada lateral de Edificio Las Brisas; colapso de pared y espectros de Fourier del suelo. Fuente: Sánchez (2016).

La velocidad de la onda de corte es de 420 m/s, luego se trata de un perfil de suelo tipo “C”.

- **Torre Marina 2**

En la figura 8 (a) se observa el Edificio Torre Marina 2 y en el 8 (b) se ve el Edificio Las Brisas los dos se hallan separados unos 500 metros; en la 8 (c) se ve el espectro de Fourier del suelo del Edificio Torre Marina 2.

La frecuencia de vibración del Edificio Torre Marina 2 es mayor que la del Edificio Las Brisas; por lo tanto el suelo tiene menor período de vibración y por ende es mejor suelo. El valor de $V_{s30} = 593\ m/s$. Por lo tanto se tiene un perfil de suelo tipo “C”.

El Edificio Torre Marina 2, es irregular en planta (Tiene forma de “L”) y es irregular en elevación, va disminuyendo los pisos conforme crece en altura. El edificio tiene 6 pisos y una terraza accesible. Soportó el sismo de 1998 y en el terremoto de 2016, tuvo un buen desempeño con daño en mampostería. En la intersección de la “L” que es la zona más vulnerable se tiene el ascensor con muros de 25 cm, en forma de “C” esto ayudó a tener un buen desempeño. Si no se refuerza la estructura en el próximo sismo el daño será mayor.

Como se podrá apreciar los suelos de Bahía de Caráquez son suelos resistentes que clasifican como perfiles tipo “C”. Entonces surge la pregunta porque tuvieron un daño considerable las estructuras de altura. Esta respuesta se trata de contestar en este artículo analizando los períodos de vibración de los suelos y por esto se piensa que el período de vibración del suelo es un parámetro que debe ser tomado en cuenta para clasificar los suelos.

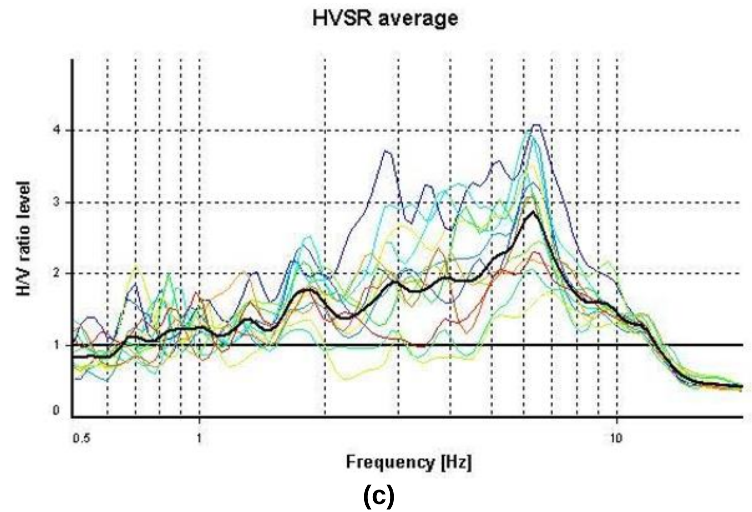
También existe la probabilidad de que en algunas estructuras hubo amplificación de las ondas por el factor de transmisibilidad que relaciona la frecuencia de la estructura con la frecuencia del suelo, tema que no es abordado en este artículo. Aguiar (2012).



(a)



(b)



(c)

Figura 8 (a) Ubicación de Edificio Torre Marina 2; (b) Ubicación de Edificio Las Brisas; (c) Espectros de Fourier de suelo de Edificio Torre Marina 2.
Fuente: Sánchez (2016)

- **Edificio El Almirante**

Otro edificio en forma de “L” de 9 pisos de Hormigón Armado, construido en 1991, tuvo un daño considerable en el sismo de 1998 y fue reparado y parece que también fue reforzado con la construcción de paredes con armadura vertical.

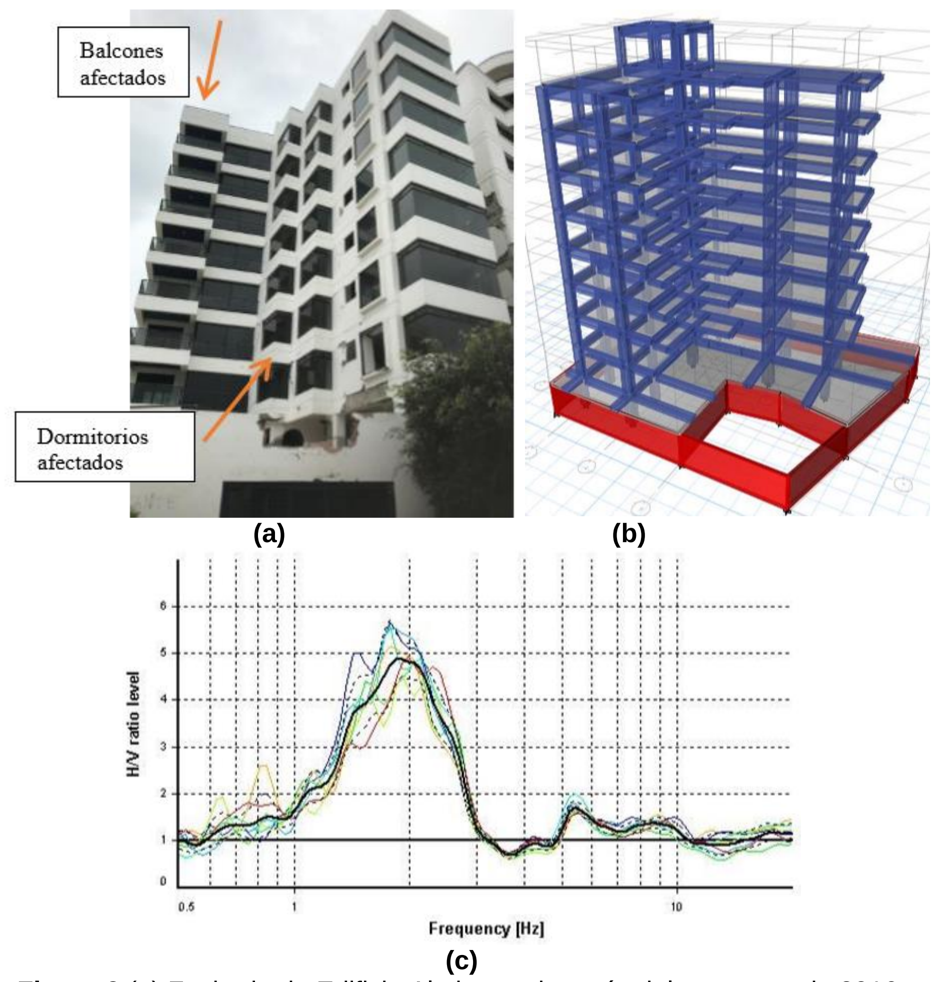


Figura 9 (a) Fachada de Edificio Almirante después del terremoto de 2016; (b) Modelo de análisis sísmico de Edificio; (c) Espectros de Fourier del suelo del Edificio Almirante. Fuente: Sánchez (2016)

En Sánchez (2016) se indica que las fisuras de la cerámica de los pisos, que se dieron en el sismo de 1998 fueron tapadas con la colocación de nueva cerámica sin retirar la cerámica vieja; esto es práctica bastante común que se la realiza debido a que es bastante complejo quitar la cerámica vieja pero no se lo debe hacer ya que se incrementa notablemente el peso.

Tuvo daño moderado en los elementos de hormigón armado pero en diciembre de 2017, fue derrocado, mediante una implosión con dinamita a un costo de 240000 dólares (El Comercio del 20 de diciembre de 2017)

El Edificio Almirante tenía balcones con voladizos de longitud apreciable los mismos que tuvieron una deflexión vertical, los más afectados son los indicados en la figura 9 (a), esto es consecuencia de la componente vertical de movimiento del suelo. En la figura 9 (b) se presenta un modelo en tres dimensiones del edificio que ayuda a visualizar la estructura, se aprecia que no existen muros de corte ni en la zona de gradas y ascensor que se hallaba en la parte donde se ve la tapa grada.

En la figura 9 (c) se aprecia que la frecuencia de vibración del suelo es ligeramente menor a 2 Hz, de tal manera que el período de vibración es alto. La velocidad de la onda de corte en el suelo de este edificio es 340 m/s, ligeramente inferior para ser tipo "D" por lo que clasifica como "C".

- **Edificio Spondyllus**

La mayor parte de edificios de Bahía de Caráquez, que tienen vista al mar destinan el primer piso para parqueaderos y sobre la losa de este piso construyen una piscina, lo que ocasiona un incremento notable de carga; edificios con esta estructuración tuvieron daño durante el terremoto de 2016 y buena parte de ellos han sido derrocados. El edificio Spondyllus es de hormigón armado de 9 pisos y no tiene piscina, fue construido en 1991, tuvo daño durante el terremoto de 1998 y fue reforzado, mediante la técnica del encamisado de columnas y con la incorporación de muros de corte de 20 cm, de espesor.

En la figura 10 se ve la planta del edificio que es regular en planta y elevación. Las columnas inicialmente tenían una sección transversal de 60/60 cm, fueron encamisadas a 85/85 cm, también se aprecia los lugares en los cuales colocaron muros de corte de 20 cm.

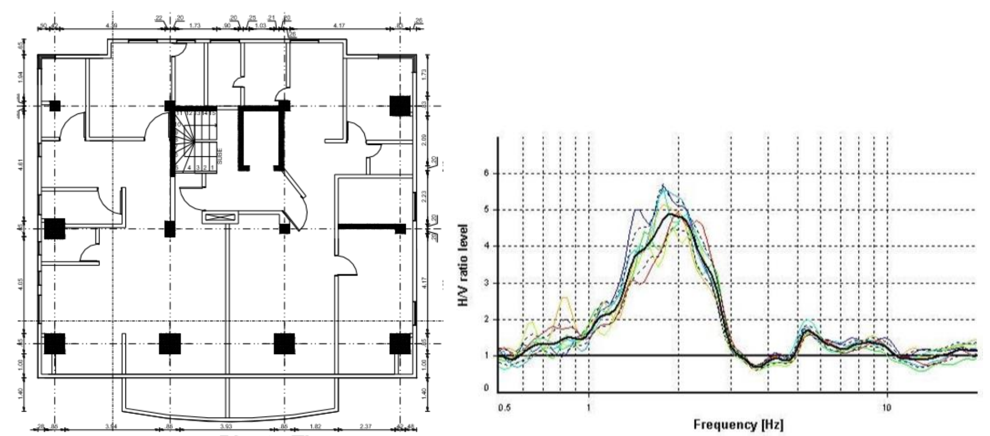


Figura 10 Planta del Edificio Spondyllus que fue reforzado luego del sismo de 1998 y espectro de Fourier del suelo. Fuente: Sánchez (2016)

A la derecha de la figura 10, se indica el espectro de Fourier, que sirve para hallar el período de vibración del suelo aplicando la técnica de Nakamura. La velocidad de la onda de corte de este suelo es 390 m/s por lo que clasifica como suelo tipo "C".

3. RELACIÓN ENTRE ESPECTROS DE FOURIER Y V_{s30}

En el apartado anterior, se presentó una buena parte de las estructuras donde se realizaron estudios geofísicos para determinar dos parámetros a saber la velocidad de la onda de corte y el período de vibración del suelo.

Ahora en este artículo interesa analizar la amplitud máxima A_{peak}, la frecuencia máxima f_{peak} del Espectro de Fourier y ver la relación que existe con el valor de V_{s30}. Pero a más de ello interesa conocer más el suelo con estos parámetros geofísicos. Por esta razón en la tabla 1, se presentan los valores hallados en los 17 sitios de Bahía de Caráquez.

NOMBRE DEL EDIFICIO		Fpeak (1/seg)	Apeak	T(seg)	Vs30 (m/seg)	Factor amplificación
1	FRAGATA	1.053	5.75	0.95	390	5.6
2	JALIL	1.182	3.05	0.85	390	
3	ZEDEÑO	6.5	2.85	0.15	560	4.4
4	LAS BRISAS	2.88	2.2	0.35	420	21
5	TORRE MARINA 1	6.3	2.859	0.16	560	12
6	TORRE MARINA 2	8.178	2.763	0.12	593	4.2
7	MYKONOS	1.842	4.867	0.54	340	4
8	CEVALLOS 1	2.674	5.215	0.37	355	2.7
9	PIRATA	6.3	2.05	0.16	560	3.2
10	PATRICIOS	9.493	5.562	0.11	599	5.9
11	VIGIA	2.881	2.11	0.35	430	2.8
12	SPONDYLLUS	1.35	3.014	0.74	390	2.5
13	DOS HEMISFERIOS	2.881	2.11	0.35	430	2.8
14	HORIZONTE	2.881	2.11	0.35	430	3.6
15	ALMIRANTE	1.842	4.867	0.54	340	3.6
16	AGUA MARINA	2	5	0.52	358	3
17	EDIFICIO CHAVEZ	2.138	3.597	0.47	420	18

Tabla 1 Propiedades de algunos suelos de Manta. Fuente: Sánchez (2016)

En base a la velocidad de la onda de corte, de la tabla 1, se desprende que 13 de los suelos son tipo “C” y 4 son tipo “D”, estos últimos con valores de V_{s30} muy cercanos al límite inferior del perfil de suelo “C” que es de 360 m/s. Según esto todos los suelos de Bahía de Caráquez son buenos suelos y no es así, lo que conduce a pensar varias cosas, entre ellas que el valor de V_{s30} no es un buen parámetro para clasificar por si solo los suelos, que se requiere complementar con otros parámetros.

No se entiende como un suelo con $V_{s30} = 420\ m/s$ y un período de vibración del suelo de 0.35 s, pueda tener un factor de amplificación, muy alto, de 21 (Caso

del Edificio Las Brisas) Por otra parte, el suelo del Edificio Vigía tiene un $V_{s30} = 430\ m/s$, un período de 0.35 s, y el factor de amplificación es de 2.8. En los dos casos la amplitud del espectro de Fourier es muy parecido: 2.11 para el Vigía y 2.2 para las Brisas. No es lógico que suelos con propiedades dinámicas muy parecidas tengan factores de amplificación tan diferentes 21 y 2.8. (Es probable que a lo mejor existe un error de escritura). Por este motivo no se comenta nada sobre los factores de amplificación que se indican en la última columna de la tabla 1. Es una lástima que no se pueda comentar sobre los factores de amplificación que se hallan a partir de la Técnica de Nakamura.

Existen otras maneras de encontrar factores de amplificación, también conocidas como factores de sitio y es en base a las ecuaciones de movimientos fuertes. Solo por citar dos casos, para encontrar los factores de amplificación de desplazamiento del suelo, se puede trabajar con las ecuaciones de movimientos fuertes de Akkar y Bommer (2007) o con las de Cauzzi y Faccioli (2008). Pero habría sido interesante hallar estos factores con la Técnica de Nakamura.

4. ESTUDIOS REALIZADOS A NIVEL MUNDIAL

Ghofrani & Atkinson (2014) realizaron un estudio muy interesante con dos bases de datos, la una que compuesta por 52565 registros de aceleración del suelo de sismos registrados en Japón y la otra compuesta por 20924 registros de 4080 estaciones de la red NGA-West 2. Se entiende que en cada estación se obtuvo la velocidad de la onda de corte por métodos geofísicos.

De tal manera que trabajaron con dos base de datos una local proveniente de sismos de Japón, y otra a nivel más general con sismos registrados en algunos países del mundo que es la NGA-West 2. Es importante conocer los resultados obtenidos en Japón ya que en ese País se sabe que sus suelos tienen una capa poco profunda antes de tener un suelo muy resistente.

Por los resultados de los espectros de Fourier y la velocidad de la onda de corte de los suelos de Bahía de Caráquez, se piensa que este suelo es similar al de Japón en el sentido de que se debe tener una capa poco profunda del orden de los 100 metros antes de tener un suelo resistente.

Para comprobar esta hipótesis se presenta primero los resultados obtenidos con la base de datos de Japón y allí se colocará los valores encontrados en los 17 lugares de Bahía de Caráquez, hallados en el estudio geofísico, para ver el grado de aproximación que se tiene. Evidentemente que no se trabajará con la curva de valores medios sino con la curva de valores medios más menos una desviación estándar.

Pero de paso también se quiere correlacionar con los resultados hallados por Ghofrani & Atkinson (2014) con la base de datos NGA-West 2, todo esto ayudará a conocer más los suelos de la Puntilla de Bahía de Caráquez, donde se tiene muy bonitos edificios de mediana altura.

Con la base de datos de Japón, Ghofrani & Atkinson (2014) llegaron a las siguientes ecuaciones.

$$logV_{s30} = 0.38\log(f_{peak}) + 2.35 \pm \sigma \quad (1)$$

$$logV_{s30} = -0.64\log(A_{peak}) + 2.88 \pm \sigma \quad (2)$$

Las variables no definidas todavía, son: f_{peak} frecuencia donde la amplitud es máxima del espectro de Fourier; A_{peak} es la amplitud máxima de la relación espectral de la componente horizontal con relación a la componente horizontal; σ es la desviación estándar. Para la ecuación (1) $\sigma = 0.16$, y para la ecuación (2) la desviación es $\sigma = 0.18$.

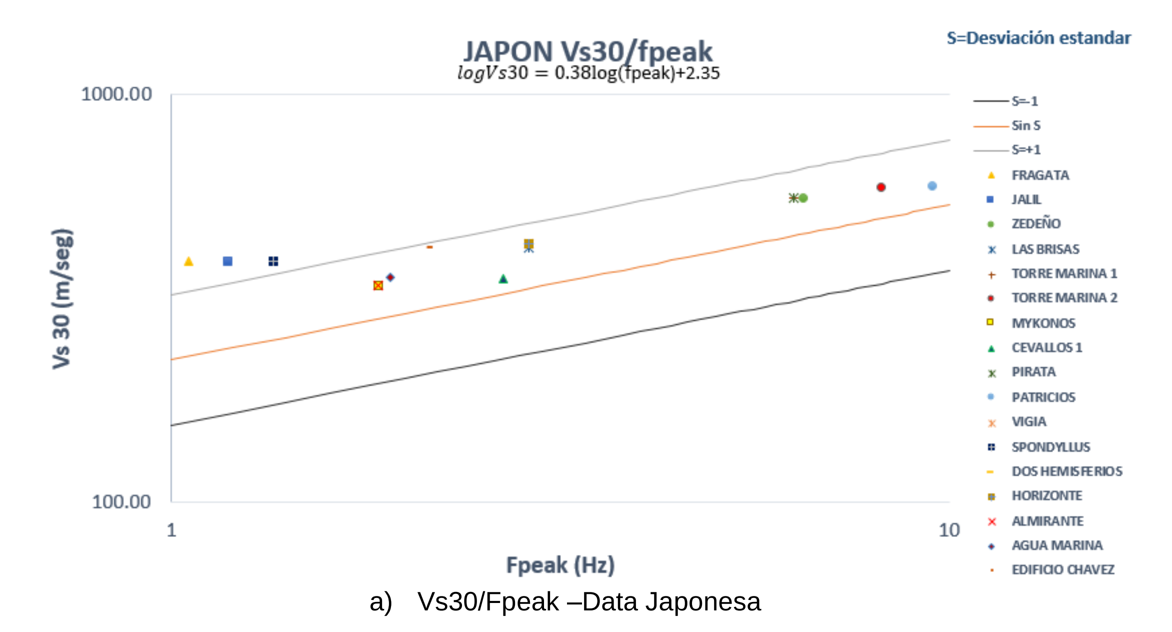
Con la base de datos NGA-West 2 (Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER) de sismos registrados principalmente en: Estados Unidos, Japón, China, Italia y Taiwan, encontraron las siguientes ecuaciones.

$$logV_{s30} = 0.20\log(f_{peak}) + 2.56 \pm \sigma \quad (3)$$

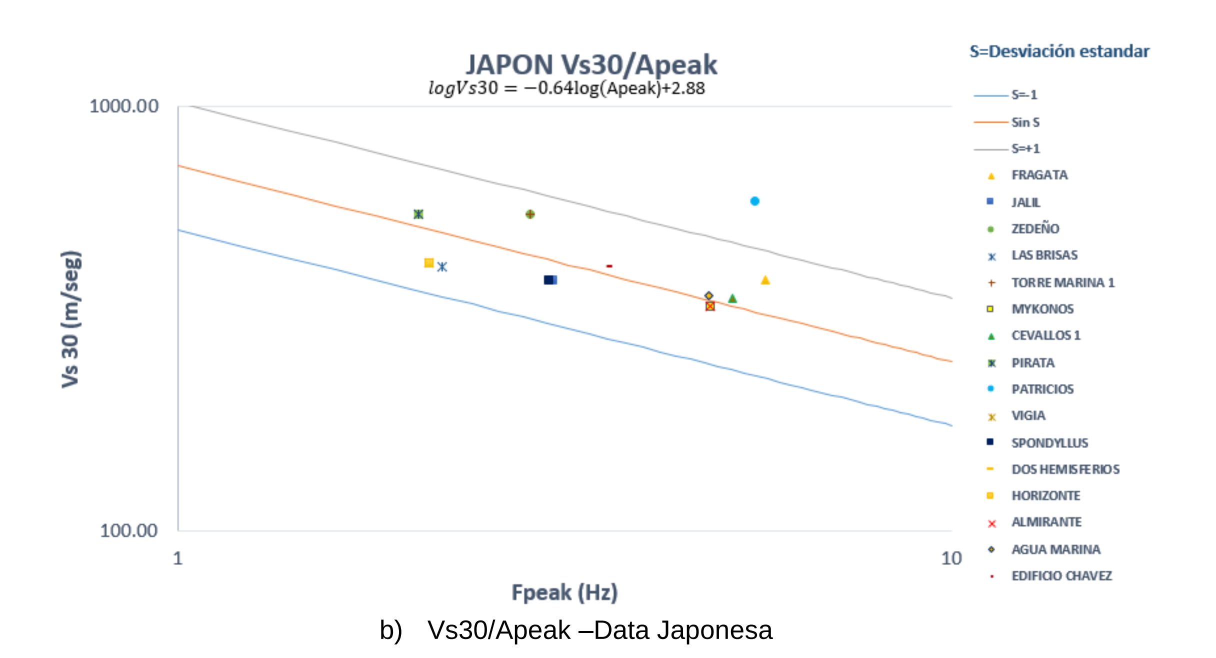
$$logV_{s30} = -0.46\log(A_{peak}) + 2.86 \pm \sigma \quad (4)$$

Los valores de la desviación estándar son: 0.16 para la frecuencia y 0.15 para la amplitud.

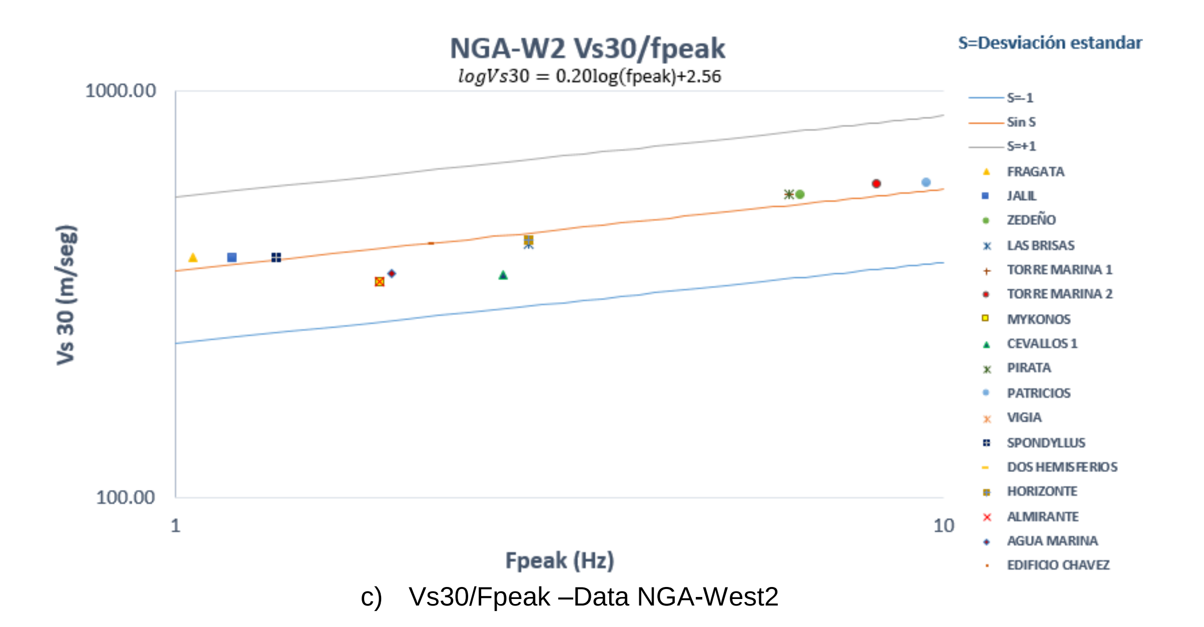
En las figuras 11 a) y b) se han incorporado los datos geofísicos de los suelos de Bahía de Caráquez a los resultados encontrados por Ghofrani & Atkinson (2014), se observa que la mayor parte de puntos se encuentran en esta franja de resultados, lo que significa una buena aproximación de los suelos de Bahía de Caráquez a los suelos de Japón.



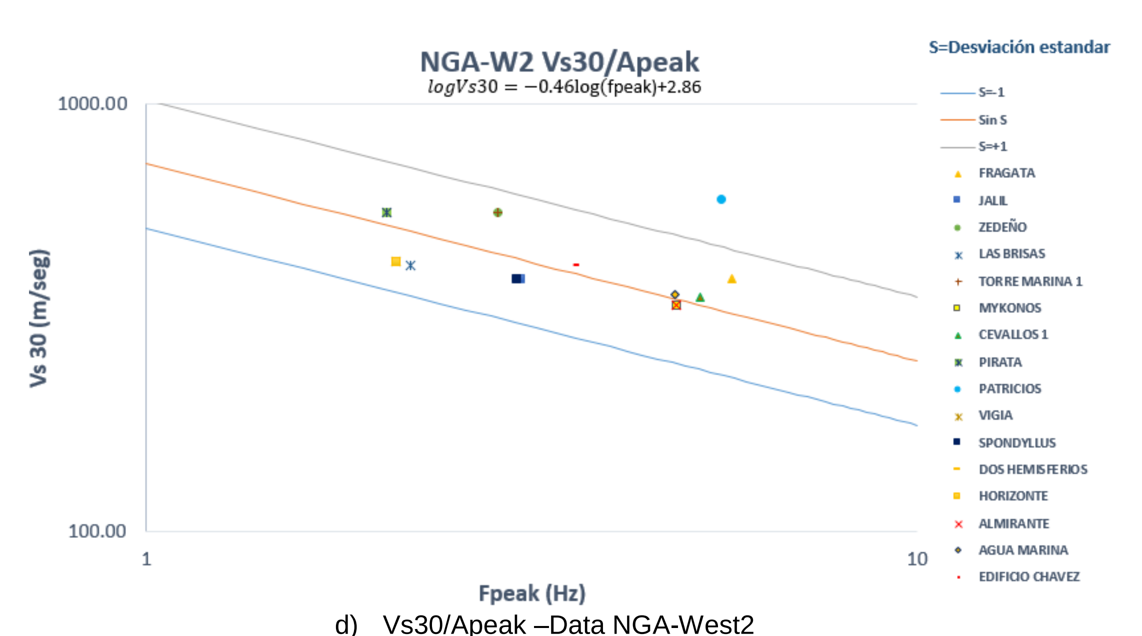
a) Vs30/Fpeak –Data Japonesa



b) Vs30/Apeak –Data Japonesa



c) Vs30/Fpeak –Data NGA-West2



d) Vs30/Apeak –Data NGA-West2

Figura 11 Resultados de las investigaciones de Ghofrani & Atkinson (2014) en las que se han colocado los datos geofísicos de los suelos de la Puntilla de Bahía de Caráquez; a) y b) Base de datos de Japón; c) y d) Base de datos de NGA-W2. Fuente: Este estudio

Las figuras 11 c) y d) son similares a la 11 a) y b) pero con la base de datos NGA-West2. En este caso se aprecia una mejor correlación especialmente en la relación f_{peak} con V_{s30}. Pero igual en la base de datos NGA-West2 se tiene sismos registrados en Japón.

Lo importante de todo esto es también reconocer que se puede obtener la velocidad de la onda de corte a partir del Método de Nakamura en que se determina el período de vibración del suelo y se puede hallar con cualquiera de las ecuaciones obtenidas por Ghofrani & Atkinson (2014)

5. ZONA DE MÁS DAÑO Y PERÍODO DEL SUELO

El primero de los autores de este artículo, conoce muy bien la estructura del Edificio Fragata y sabe que ese edificio fue bien diseñado, sus elementos estructurales tenían ductilidad, que el hormigón fue provisto por Holcing, que llevan un riguroso control de calidad. (Aguiar, 2017) sin embargo de ello tuvo daño el mismo que fue indicado en el apartado 2.

Si Fragata, fue bien diseñado y se halla sobre un perfil de suelo tipo “C” clasificación en base únicamente a la velocidad de la onda de corte. Porque se dañó al igual que algunos edificios que se hallaban en ese sector que no son vulnerables sísmicamente, (No se dispone de registros en Bahía de Caráquez del terremoto de 2017).

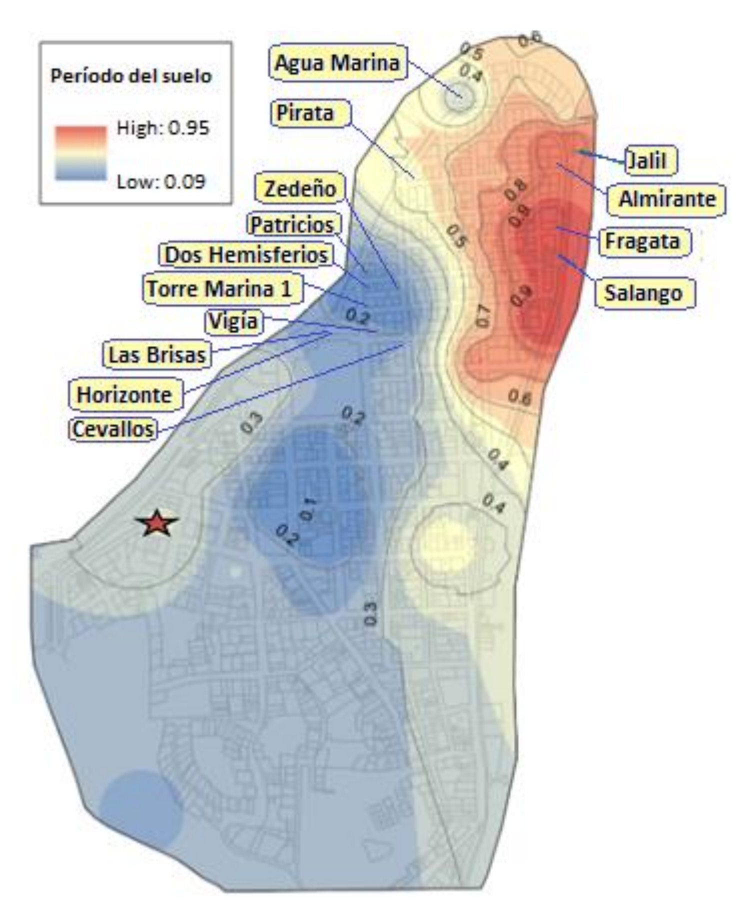


Figura 12 Período de los suelos de Bahía de Caráquez.
Fuente: Paredes (2017)

Al ver que el daño en los edificios de la Av. Ratti pero en el sector de la Puntilla propiamente dicho y al observar la figura 12, en que se presenta el período de vibración del suelo, donde se ve que el período es mayor a 0.7 segundos. Se concluye que las ondas sísmicas fueron amplificadas notablemente durante el terremoto de 2016.

Una forma muy sencilla de entender el período del suelo, es la siguiente. El período de vibración de una estructura puede calcularse con $T = 0.11\ N$. Siendo N el número de pisos; así un edificio de 3 pisos tendrá un período de 0.33 segundos y uno de 7 pisos de 0.77 segundos. En un sismo el edificio de 7 pisos se va a desplazar más que el de 3 pisos, por ser más alto.

Lo propio sucede en los suelos, un sitio que tenga un período de 0.9 segundos se va a desplazar mucho más que un lugar con un período de 0.2 segundos.

Si bien los suelos de la Puntilla de Bahía de Caráquez son tipo “C” no tuvieron el mismo comportamiento durante el terremoto de 2016, porque tuvieron diferentes períodos de vibración del suelo. Esto se debe reconocer en un estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad y en las normativas sísmicas.

6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Luego del análisis de 17 lugares donde se obtuvo la velocidad de la onda de corte V_{s30} y el período de vibración del suelo, ubicados la mayor parte de ellos en la puntilla de Bahía de Caráquez. Los parámetros geofísicos obtenidos en este estudio se han comparado con los resultados realizados por Ghofrani & Atkinson (2014) al trabajar con dos bases de datos, la primera con solo sismos registrados en Japón y la segunda con la base de datos NGA-West 2. Del estudio realizado se desprenden los siguientes comentarios y conclusiones.

La mayor parte de suelos de la puntilla de Bahía de Caráquez, clasifican como "C" de acuerdo al NEC-15, esta clasificación basada solamente en la velocidad de la onda de corte, no es correcta y puede llevar a que los proyectistas estructurales se confíen con la estructuración del edificio, debido a que un perfil de suelo tipo "C" es un suelo muy bueno.

Se debe trabajar en una microzonificación sísmica de Bahía de Caráquez donde se obtengan los factores de sitio de toda la ciudad y con más detalle en la zona donde el período de vibración del suelo es mayor a 0.7 segundos. De seguro que en esta zona los factores de sitio serán más altos que los recomendados por la NEC-15.

Se debe pensar en incorporar a la clasificación de los suelos, de la futura Norma Ecuatoriana de la Construcción, el período de vibración del suelo ya que como se ha visto en este estudio existen suelos que tienen la misma velocidad de la onda de corte pero diferentes períodos de vibración del suelo y en los suelos que tienen un período de vibración del suelo más alto se tuvo mayor daño en las estructuras.

El suelo de la Puntilla de Bahía de Caráquez tiene una capa superficial que está alrededor de los cien metros donde se estima se tiene un suelo muy rígido similar a una roca potente.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., (2017), "No se acepta el diseño por ductilidad. Caso del Edificio Fragata que incursionó en el rango no lineal", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **22 (3),** 327-391. Disponible en: www.riie.espe.edu.ec
2. Aguiar, R., & Mieles, Y. (2016). Análisis de los edificios que colapsaron en Portoviejo durante el terremoto del 16 de abril de 2016. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 21*(3), 257-282. Disponible en: www.riie.espe.edu.ec
3. Aguiar R., (2012), *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB,* Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH. Segunda edición, 416 pp. Quito.
4. Aguiar R., Torres M., Romo M., Caiza P., (1998), *El sismo de Bahía,* Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 125 pp. Sangolquí.

5. Akkar S., y Bommer J., (2007), “Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and Middle East”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **36,** 1275-1301.
6. Cauzzi C., y Faccioli E., (2008), “Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records”, *Journal of Seismology,* 24 p.
7. Ghofrani H., Atkinson G., (2014), “Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectral ratios of earthquakes in the NGA-WEST 2 and Japanese databases”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* **67,** 30-43.
8. Paredes P., (2016), *Riesgo Sísmico en Edificios de Bahía de Caráquez,* Presentación en Congreso de Ingeniería Sísmica, Estructural y Geotécnica. Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha. Quito.
9. Rodríguez M., (2017), *Interpretación de los daños y colapsos en edificaciones observadas en la ciudad de México en el terremoto del 19 de septiembre 2017,* Informe enviado el 13 de octubre de 2017.
10. Sánchez T., (2016), *Análisis, estudio y planteamiento de soluciones estructurales de edificaciones afectadas por el terremoto del 16 de abril de 2016 en la Provincia de Manabí, Cantón Sucre, Identificadas como de alto riesgo, Grupo N. 9. Memoria Técnica y de Evaluaciones Mecánica. Estudio de 18 Edificios,* Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI.